



Revista Brasileira de Geomorfologia - v. 13, nº 1 (2012)

www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

DENUAÇÃO QUÍMICA E REBAIXAMENTO DO RELEVO EM BORDAS INTERPLANÁLTICAS COM SUBSTRATO GRANÍTICO: DOIS EXEMPLOS NO SE DE MINAS GERAIS

CHEMICAL DENUDATION AND RELIEF DEGRADATION IN INTERPLANALTIC EDGES IN GRANITIC LANDSCAPE: TWO EXAMPLES IN SOUTH-EASTERN MINAS GERAIS

Luis Felipe Soares Cherem

Instituto de Estudos Sócio-Ambientais - Universidade Federal de Goiás - 61 3521 1184 - Campus II - Samambaia - Goiânia / Goiás - CEP 74001-970 - e-mail: luis.cherem@gmail.com

César Augusto Chicarino Varajão

Departamento de Geologia - Universidade Federal de Ouro Preto - 31 3559 1876 - Campus do Cruzeiro - Bauxita - Ouro Preto / Minas Gerais - CEP 35400-000 - e-mail: cesarvarajao@gmail.com

André Augusto Rodrigues Salgado

Departamento de Geografia - Universidade Federal de Minas Gerais - 31 3409 5462 - Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - Minas Gerais - CEP 31270-901 - e-mail: geosalgado@yahoo.com.br

Angélica Fortes Drummond Chicarino Varajão

Departamento de Geologia - Universidade Federal de Ouro Preto - 31 3559 1876 - e-mail: angelicavarajao@gmail.com

Regis Braucher

Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement - Université Paul Cezanne (France) - Europôle Méditerranéen de l'Arbois - Ave. Louis PHILIBERT - BP 80 - Aix en Provence - 13545 cedex 04 - e-mail: braucher@cerege.fr

Didier Bourlés

Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement - Université Paul Cezanne (France) - e-mail: bourles@cerege.fr

Antônio Pereira Magalhães Júnior

Departamento de Geografia - Universidade Federal de Minas Gerais - 31 3409 5462 - e-mail: magalhaesufmg@yahoo.com.br

Herminio Árias Nalini Júnior

Departamento de Geologia - Universidade Federal de Ouro Preto - 31 3559 1876 - e-mail: mailto:nalini@degeo.ufop.com.br

Resumo

Os interflúvios entre as grandes bacias hidrográficas do Brasil oriental correspondem, muitas vezes, a degraus morfológicos que dividem planaltos escalonados. Esses degraus são feições escarpadas resultantes da diferença de intensidade dos processos erosivos nas cabeceiras dessas grandes bacias. Esse artigo apresenta um estudo da denudação química em dois degraus dessas

bordas interplanálticas localizadas no sudeste de Minas Gerais: (i) o degrau de Cristiano Otoni (250m) divisor das bacias dos rios São Francisco (terras altas ou planalto superior) e Doce (terras baixas ou planalto inferior) e, (ii) o degrau de São Geraldo (450m) que divide as bacias dos rios Doce (terras altas ou planalto superior) e Paraíba do Sul (terras baixas ou planalto inferior). Para entender a dinâmica da denudação química nessas bordas escarpadas, foram monitorados o total de sólidos dissolvidos (TDS), o Eh, o pH, a vazão de 21 bacias hidrográficas distribuídas ao longo de ambas vertentes dos degraus (terras altas e frente da escarpa) no final dos períodos chuvoso (abril) e de estiagem (agosto) em um mesmo ano hidrológico (2009). As bacias amostradas situam-se sobre o mesmo substrato litológico (granitóides). Utilizando os dados de TDS e vazão foram calculadas as taxas de denudação química ($\text{ton.ano}^{-1}.\text{km}^{-2}$) e as taxas médias de rebaixamento do relevo (m.Ma^{-1}) para as bacias amostradas. Os resultados revelaram que as águas fluviais dos degraus estudados apresentam assinaturas geoquímicas distintas: (i) nas terras altas, os valores de pH são sempre ácidos ($\approx 6,35$) e nas escarpas, levemente básicos ($\approx 7,10$); (ii) os valores de TDS (carga dissolvida) nas terras altas ($\approx 10,00 \text{ mg.L}^{-1}$) são menores que os encontrados nos frente das escarpas ($\approx 35,00 \text{ mg.L}^{-1}$ para São Geraldo e, $\approx 18,00 \text{ mg.L}^{-1}$ para Cristiano Otoni). As taxas de rebaixamento do relevo ocasionadas pela denudação química são semelhantes em ambas as terras altas ($\approx 2,40 \text{ m.Ma}^{-1}$). Em contrapartida, a frente da escarpa da Serra de São Geraldo apresenta taxa de denudação química mais elevada ($7,06 \text{ m.Ma}^{-1}$) do que o Degrau de Cristiano Otoni ($4,25 \text{ m.Ma}^{-1}$). Essa diferença foi interpretada como diretamente relacionada à altura das escarpas, 450 e 250 m, respectivamente.

Palavras-chave: escarpas, bordas interplanálticas, denudação química.

Abstract

The interfluves of major river basins of Eastern Brazil often correspond to escarpments between stepped reliefs. These escarpments are result of the differential erosion along the headwaters of these major basins, dividing highlands from lowlands. This paper presents a study of chemical denudation along two of these escarpments dividing three levels in Minas Gerais: (i) the step of Cristiano Otoni (250m) which divides the São Francisco River basin (highland) from the Doce River River basin (lowland) and (ii) the step of São Geraldo (450m) which divides the Doce River basin (highland) from the Paraíba do Sul River basin (lowland). In order to understand the dynamics of chemical denudation of these two geomorphological steps, the total dissolved solids (TDS), the Eh, the pH and the flow of the stream of 21 catchments have been monitored in the end of rain season (March) and dry one (August) for the same hydrological year (2009). Chemical denudation rates ($\text{ton.y}^{-1}.\text{km}^{-2}$) and average relief lowering rate (m.My^{-1}) have been calculated by using TDS and flow. The results have revealed that the water of the studied geomorphological steps have different geochemical signatures: (i) in the highlands, the pH is always acidic (around 6.35) and in the escarpment fronts, slightly basic (around 7.10), (ii) the TDS values in the highlands (around 10.00 mg L^{-1}) are smaller than those found in the escarpment fronts (around 35.00 mg L^{-1} for São Geraldo, and around $18,00 \text{ mg.L}^{-1}$ for Cristiano Otoni). The lowering rates of relief caused by chemical denudation are similar for both highlands (around 2.40 m.Ma^{-1}). Otherwise, the escarpment front of the step of São Geraldo are higher (7.06 m.Ma^{-1}) than the step of Cristiano Otoni (4.25 m.Ma^{-1}). This difference has been interpreted as a direct consequence of escarpments height, 450 and 250 m respectively.

Keywords: escarpments, interplateau edges, chemical denudation.

Introdução

A mensuração da denudação química auxilia na análise da dinâmica do relevo à luz de consagrados modelos (Tricart, 1972; Büdel, 1982; Summerfield, 1991; Thomas, 1994) e permite novas interpretações sobre a dinâmica de regiões já analisadas (Salgado *et al.*, 2004; Salgado *et al.*, 2007; Burke *et al.*, 2009; Varajão *et al.*, 2009). Nesse artigo, dá-se destaque aos estudos da evolução de bordas interplanálticas (Gunnell *et al.*, 2007; Ollier, 1985; Thomas, 1995; Vitte, 2005), onde, sob condições climáticas tropicais úmidas, o intemperismo químico e consequente denudação química têm papel fundamental (Dunne, 1978; Salgado e Valadão, 2003; Riebe *et al.*,

2004; Salgado *et al.*, 2004; Blanckenburg, 2005; Kirchner *et al.*, 2006; Beauvais *et al.*, 2008; Schaller *et al.*, 2008; Ferrier *et al.*, 2008; Varajão *et al.*, 2009).

O papel das condições climáticas na variação da intensidade do intemperismo químico é determinante na concentração e na composição dos solutos e taxas de alteração em bacias hidrográficas (White e Blum, 1995; Millot *et al.*, 2002; Dupré *et al.*, 2003). Oliva *et al.* (2003) destacam a temperatura, o escoamento superficial e a disponibilidade de minerais primários como os principais fatores controladores da denudação química. Esses fatores apresentam sinergia positiva no controle da denudação química do manto de

alteração e renovação das camadas superficiais dos solos. Pinet e Souriau (1988) compilaram as taxas de denudação química e mecânica em grandes bacias hidrográficas ao redor do mundo e constataram significativa denudação mecânica associada à predominante e elevada denudação química em bacias intertropicais, como é o caso das bacias dos rios São Francisco e Negro.

A denudação química, ou perda geoquímica, corresponde à contabilização final de todos os elementos ionizados e retirados do manto de alteração por meio da água e que são drenados para fora da bacia hidrográfica (Nahon, 1991; White e Blum, 1995; White *et al.*, 1998). Sua mensuração pode ser realizada, ou por meio da contabilização do que é perdido, analisando-se as águas fluviais (Salgado *et al.*, 2004), ou do que é mantido, analisando-se o manto de alteração (Anderson *et al.*, 2002). A mensuração da denudação química a partir dos íons transportados pela água fluvial permite a contabilização instantânea desse processo, calculada a partir da relação da carga total dissolvida (*TDS*; mg.L^{-1}), da vazão (*Q*; L.s^{-1}) e da área de contribuição em determinado ponto do canal fluvial (*A*; km^2). O cálculo da denudação química em várias bacias hidrográficas de uma mesma unidade geomorfológica permite determinar a contribuição direta dos processos denudacionais químicos para o rebaixamento médio do relevo e, consequentemente, para a evolução da paisagem (Pinet e Souriau, 1988;

Oliva *et al.*, 2003; Salgado e Valadão, 2003; Salgado *et al.*, 2004; Beauvais *et al.*, 2008).

Nesse contexto, procurou-se analisar as diferenças nas características geoquímicas das águas fluviais e na intensidade da denudação química em bacias hidrográficas que drenam cada um dos lados de duas bordas interplanálticas (Figura 1): (i) entre os rios São Francisco (cabeceira sul do Rio Paraopeba) e Doce (cabeceira sudoeste do Rio Piranga), denominada de Degrau de Cristiano Otoni; (ii) entre os rios Doce (cabeceira sudeste dos rios Xopotó e Casca) e Paraíba do Sul (cabeceira noroeste do rio Pomba), denominada Serra de São Geraldo.

Objetiva-se, deste modo, entender a dinâmica da denudação química e, assim, investigar as associações entre as diferentes características morfológicas e as intensidades dos processos denudacionais em bordas interplanálticas inseridas em mesmo domínio climático (tropical úmido) e sob mesma litologia (granitóides). Essas bordas interplanálticas correspondem a escarpas (Figuras 1 e 2), apresentando um forte (voltado para o planalto inferior - as terras baixas) e um contraforte (voltado para o planalto superior - as terras altas). Optou-se pelo substrato granítico por esse tipo de rocha corresponder ao tipo de maior representatividade nas terras emersas no globo terrestre (Oliva *et al.*, 2003).

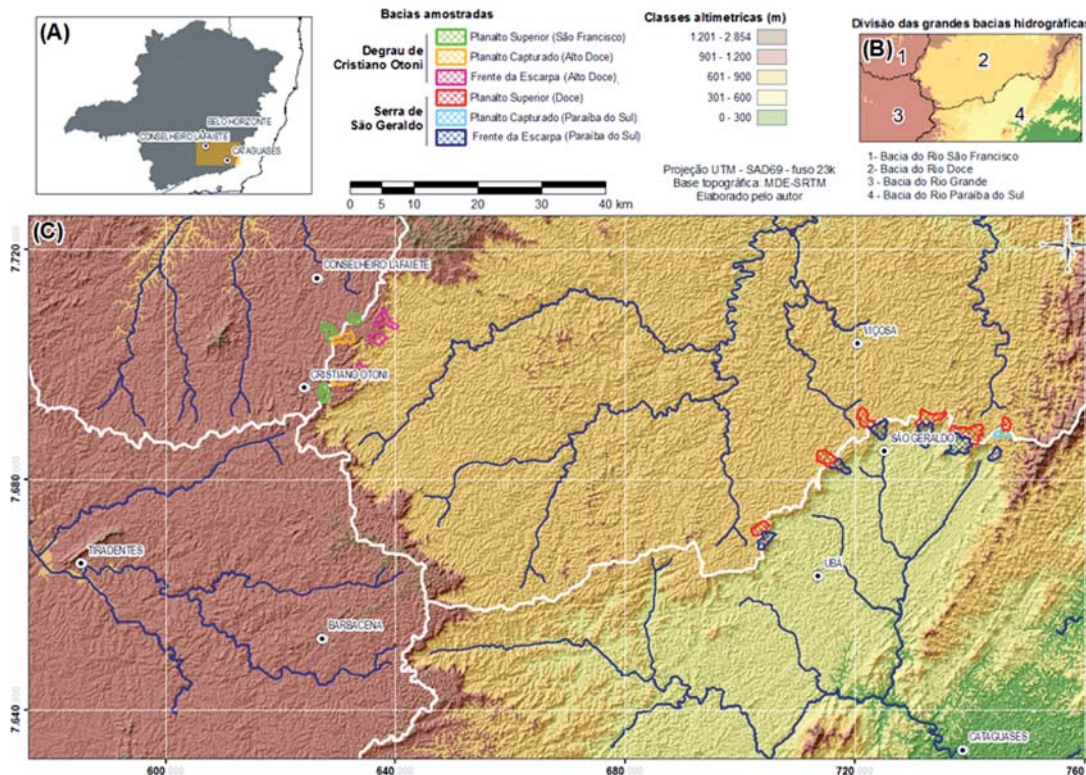


Figura 1 - Mapas de (A) contextualização em Minas Gerais; (B) divisão das grandes bacias hidrográficas; e (C) localização das escarpas estudadas, destacando as bacias amostradas.

Áreas de estudo

O degrau de Cristiano Otoni, primeira área de estudo, localiza-se na Região Central de Minas Gerais, nas proximidades de Conselheiro Lafaiete e Cristiano Otoni (Figura 1). Sua morfologia corresponde a um degrau aproximadamente linear e 250 metros de diferença altimétrica média, com frente voltada para o Alto Rio Doce. O interflúvio entre as bacias dos rios São Francisco e Doce se localiza cerca de 4km atrás da escarpa, assim, uma porção das terras altas drena para a bacia do rio Doce (Figura 2a). Nessa porção, os morros estão aproximadamente em mesma cota altimétrica e apresentam a mesma morfologia que os localizados na porção não capturada (Figura 2a). O segundo degrau estudado, a Serra de São Geraldo, localiza-se na Zona da Mata de Minas Gerais e sua morfologia corresponde a uma escarpa de 450 metros de altura média, com frente voltada para a bacia do Rio Paraíba do Sul (Figura 1). A crista dessa escarpa, ao longo de quase toda sua extensão, é paralela ao interflúvio que divide as bacias dos rios Doce e Paraíba do Sul (Figura 2b e 2c). Observam-se ainda morros testemunhos nas terras baixas, cujos topos são nivelados aos topos das terras altas (Figura 2c). Ambas as áreas de estudo localizam-se sobre rochas granitóides (Delgado *et al.*, 2003, Noce *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2009). Ressalta-se que nos mapas geológicos consultados (COMIG, 2003) não há registro de falhas coincidentes às escarpas estudadas (Figura 3).

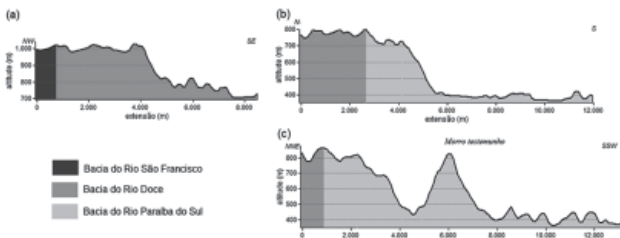


Figura 2 - Perfis longitudinais: (a) Degrão de Cristiano Otoni; (b) Serra de São Geraldo; (c) Serra de São Geraldo com destaque a morro testemunho (exagero vertical de 5 vezes).

Metodologia de Pesquisa

Essa pesquisa foi dividida em quatro etapas: (i) seleção das pequenas bacias hidrográficas; (ii) amostragem; (iii) análise laboratorial; (iv) tratamento e análise dos dados. A seleção das bacias foi orientada pela natureza comparativa da pesquisa. Desta forma, procurou-se reduzir ao máximo o número de variáveis, visando isolar o potencial erosivo. Para tal, foram selecionados pares (ou trios) de bacias conjugadas, opostas nos divisores, tendo área semelhante e localizadas sobre substrato granítico (Figura 3).

No Degrão de Cristiano Otoni foram selecionados dois trios e um par de bacias ao longo da escarpa (Figura 3B): i) bacia do São Francisco – borda das terras altas, denomi-

nadas SF01, SF02 e SF03; ii) bacias do Alto Doce – bacias de escarpa denominadas AD01, AD02, AD04; e iii) bacias do Alto Doce – borda das terras altas, porém capturadas, denominadas AD03 e AD05, e. Na Serra de São Geraldo, a escarpa segue aproximadamente um traçado semelhante ao interflúvio, exceto na captura fluvial da porção nordeste desta escarpa. Assim, foram selecionados cinco pares e um trio de bacias (Figura 3C): i) bacia do Doce – borda das terras altas, denominadas D01, D02, D03, D04, D05 e D06; ii) bacia do Paraíba do Sul – bacias de escarpa) denominadas P01, P02, P03, P04, P05 e P06; e iii) bacia do Paraíba do Sul – borda das terras altas, porém capturada, denominada P07.

A amostragem da água fluvial foi feita em cada uma das bacias no final dos períodos de chuva (abril de 2009) e de estiagem (agosto de 2009). A realização da amostragem em dois períodos do ano se deve ao fato da área de estudo estar inserida em clima tropical semi-úmido. Foram levantadas as informações necessárias ao cálculo da vazão do canal (EPA, 1997) e os parâmetros da água: temperatura, sólidos totais dissolvidos (TDS), condutividade elétrica, pH (Potencial Hidrogeniônico) e Eh (Potencial de Oxi-Redução), foram lidos em um equipamento multiparâmetro da Myron-L, modelo 6PII-CE. Em seguida, amostras de água foram coletadas e filtradas (0,45 micrômetros), a fim de evitar a contaminação com carga suspensa, sendo adicionado ácido nítrico (HNO_3), para impedir a precipitação da carga dissolvida. As amostras foram encaminhadas ao laboratório Geoquímica Ambiental do DEGEO para a medida dos íons dissolvidos, isto é, elementos maiores (Al, Ca, K, Fe, Mg, Mn, Na e Si) e menores (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mo, Ni, P, Pb, S, Sc, Sr, Ti, V, Y e Zn), utilizando-se um espectrômetro de emissão atômica com fonte de plasma (ICP-OES), da marca SPECTRO, modelo CCD, calibrado com padrões de nível internacional (STANDARD NIST 1653).

Para o cálculo da taxa de denudação química relacionou-se a carga iônica transportada pelas águas fluviais na área drenada, obtida por meio da análise da composição química dessas águas, com a vazão do curso medido (Thomas, 1994).

A taxa de denudação química é dada pela seguinte equação adaptada de Thomas (1994):

$$D = \frac{\left(\frac{TDS_{\text{verão}} \times V_{\text{verão}} \times s_{\text{verão}}}{A} \right) + \left(\frac{TDS_{\text{inverno}} \times V_{\text{inverno}} \times s_{\text{inverno}}}{A} \right)}{d}$$

onde D é a taxa de rebaixamento do relevo (verão e inverno), dada em $m.Ma^{-1}$; TDS é a carga catiônica dissolvida na água, medida no ICP, para o verão e inverno, dada em $ton.m^{-3}$; V é a vazão medida em campo, dada em $m^3.s^{-1}$; s é o tempo do período amostrado ($1,5778 \cdot 10^7$ segundos); A é a área da bacia, dada em km^2 ; d é a densidade da rocha (2,73 para os granitóides das áreas de estudo). Assim, a partir da média da taxa de rebaixamento de relevo ($m.Ma^{-1}$) calculada para todas as bacias, tem-se a taxa média de rebaixamento das bordas interplanálticas estudadas.

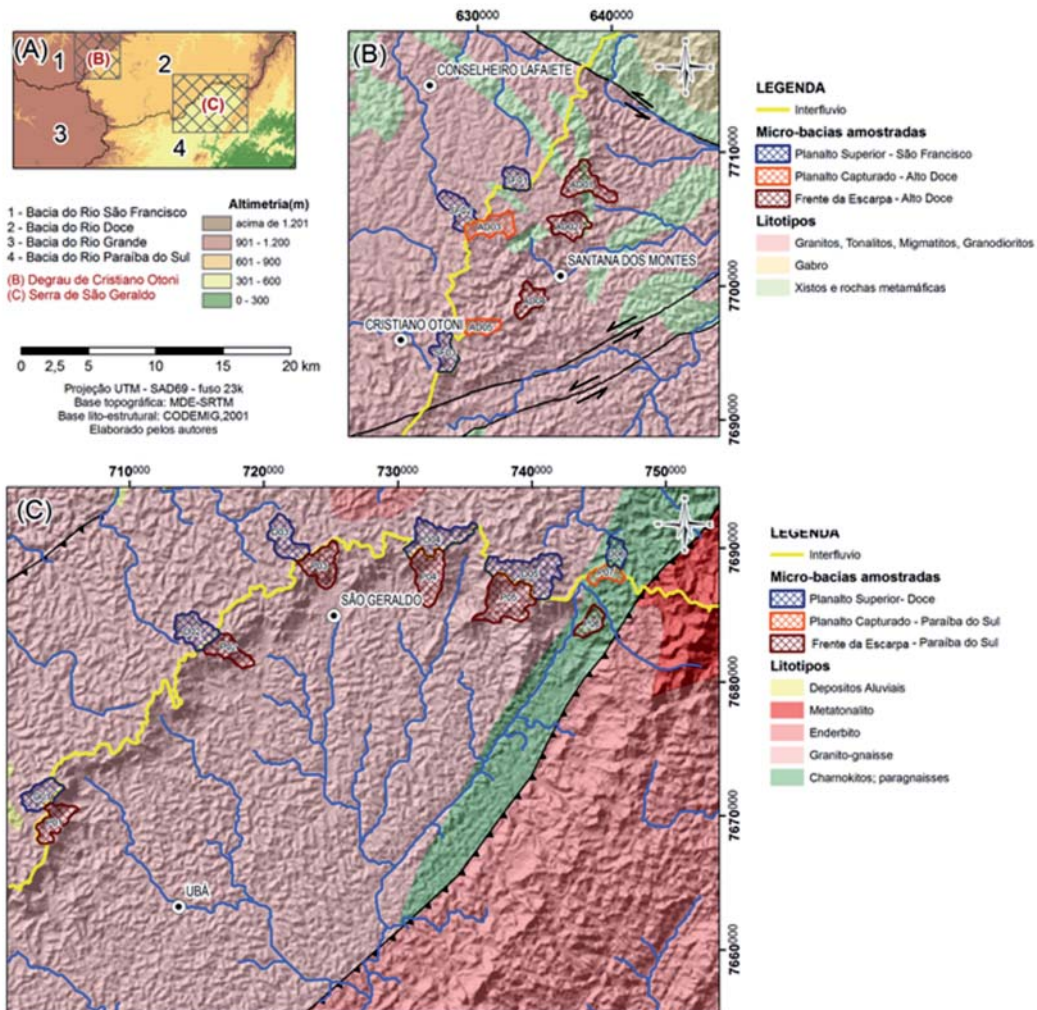


Figura 3 - Mapa de localização das bacias selecionadas para amostragem (A) e suas litoestruturas: (B) degrau de Cristiano Ottoni; e (C) Serra de São Geraldo.

Resultados e Discussões

A relação entre o Eh e o pH (verão e inverno) revelou dois grupos em ambas as estações – chuvosa (verão) e seca (inverno) (Figura 4). O pH de todas as bacias das terras altas é levemente ácido ($\approx 6,35$) e, nas escarpas, levemente básico ($\approx 7,10$). Observa-se que no verão o pH de todas as bacias é levemente mais básico do que no inverno. O Eh varia entre $-0,02$ e $0,20$ V no verão e entre $-0,015$ e $0,15$ no inverno, sendo que as bacias das terras altas apresentam, em média, valores mais elevados e com menor desvio padrão (Figura 4).

Os menores valores de Eh encontrados nas amostras de escarpa podem ser indicio de maior contribuição de águas subterrâneas, que apresentam valores de Eh inferiores a $0,10$ V (Drever, 1997). Também, os Eh medidos durante o inverno são relativamente mais baixos que para o verão, indicando a

menor contribuição da água das chuvas na composição das águas dos canais amostrados (Figura 4).

A relação entre a carga catiônica dissolvida (TDS) nas águas (inverno e verão) e os valores de pH (Figura 5) revela que nas bacias das terras altas os valores de TDS variam entre $7,0$ e $14,0$ mg.L^{-1} e os de pH entre $6,1$ e $6,7$. Por outro lado, para as bacias que drenam a escarpa os valores de pH são ligeiramente superiores entre $7,0$ e $7,4$ e os de TDS, além de superiores, mostram uma significativa variação no intervalo dos valores entre $17,0$ e $42,0$ mg.L^{-1} . Esse grande intervalo de valores de TDS sugere uma variação na quantidade dos elementos disponibilizados pelo intemperismo químico sob condições de pH estáveis ao longo do ano. Isso leva a supor que as águas que drenam as escarpas, tendo percolado perfis de solo menos evoluídos, seriam mais ricas em elementos alcalinos (Na, Ca, K, Mg), mais solúveis, que são liberados preferencialmente nos estágios iniciais do intemperismo químico.

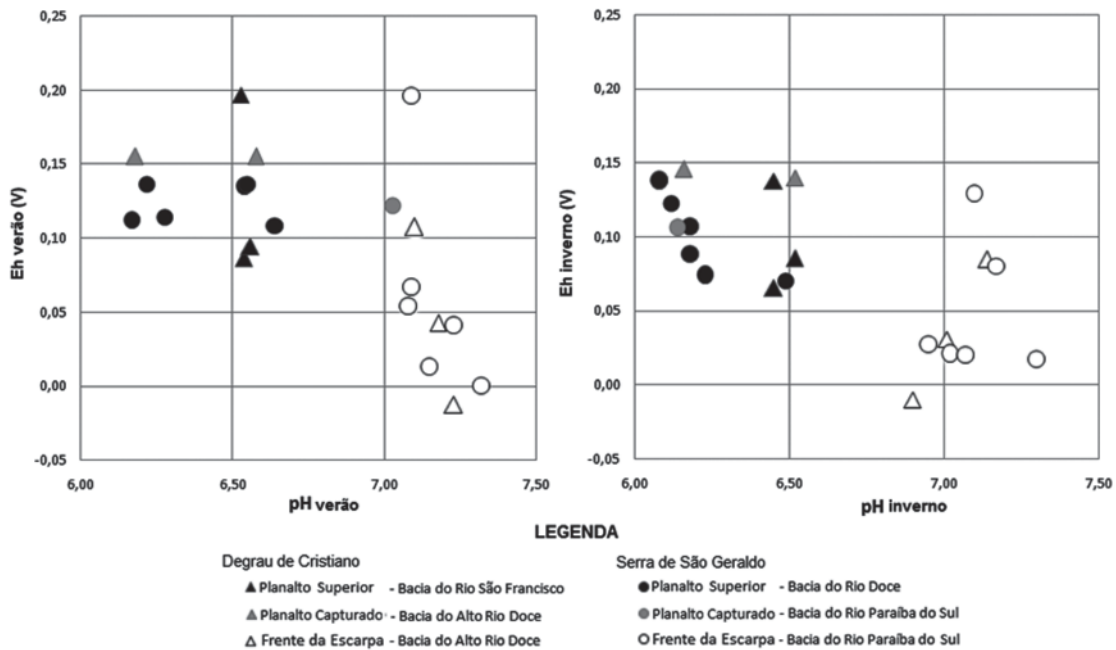


Figura 4 - Diagramas Eh e pH das águas dos canais principais das bacias monitoras, agrupadas por compartimento de relevo para verão e inverno.

Em contrapartida, as águas que drenam as terras altas, tendo percolado perfis de solo mais evoluídos, seriam mais pobres nos mesmos elementos alcalinos. Tal raciocínio é confirmado pela relação (Na+Ca+K+Mg) versus pH (Figura 6). Conseqüentemente, tal fato explica a diferença no pH entre as bacias das terras altas (pH mais ácido) e aquelas das escarpas

(pH mais básico). Finalmente, cabe ressaltar que as águas superficiais das bacias que drenam as terras altas capturadas apresentam valores de Eh, pH e TDS, similares aos valores das bacias das terras altas. Essa similaridade é indício de que os processos predominantes nas poções capturadas ainda se assemelham aos processos das porções não capturadas

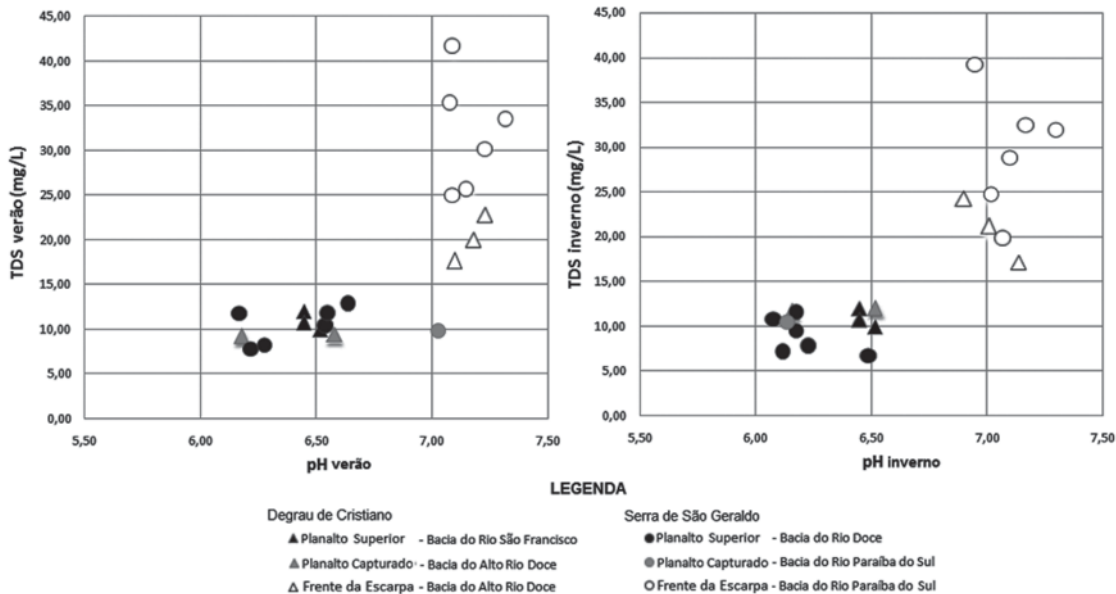


Figura 5 - Relação pH e TDS para verão e inverno.

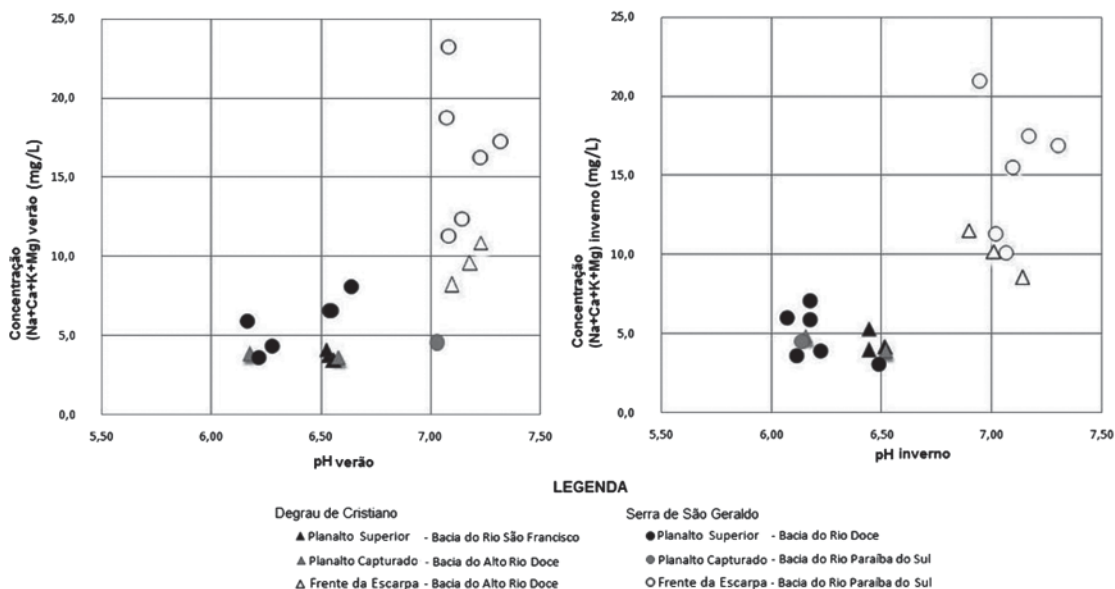


Figura 6 - Relação pH e concentração (Na+Ca+K+Mg) para verão e inverno.

A relação entre valores de TDS no período chuvoso e de estiagem mostra que, apesar do aumento significativo da vazão no verão, os valores de TDS permanecem constantes (Figura 7). Assim, o esperado efeito de dissolução da água que chega aos canais fluviais pelo escoamento superficial durante o verão, é compensado pela retirada mais intensa dos íons solubilizados do manto de alteração, o que é fica claro para as bacias que drenam as escarpas (Figura 7).

As bacias das bordas das terras altas apresentam valores próximos, entre 6,0 e 12,0 mg.L⁻¹; enquanto que, as bacias das escarpas apresentam TDS entre 17,0 e 42,0 mg.L⁻¹. No grupo das bacias das escarpas, observa-se um subgrupo para cada escarpa, sendo que os valores de TDS para as bacias de escarpa de Cristiano Otoni (Doce) estão englobados no intervalo de 17,0 a 24,0 mg.L⁻¹ e de São Geraldo (Paraíba do Sul), 25,0 à 42,0 mg.L⁻¹.

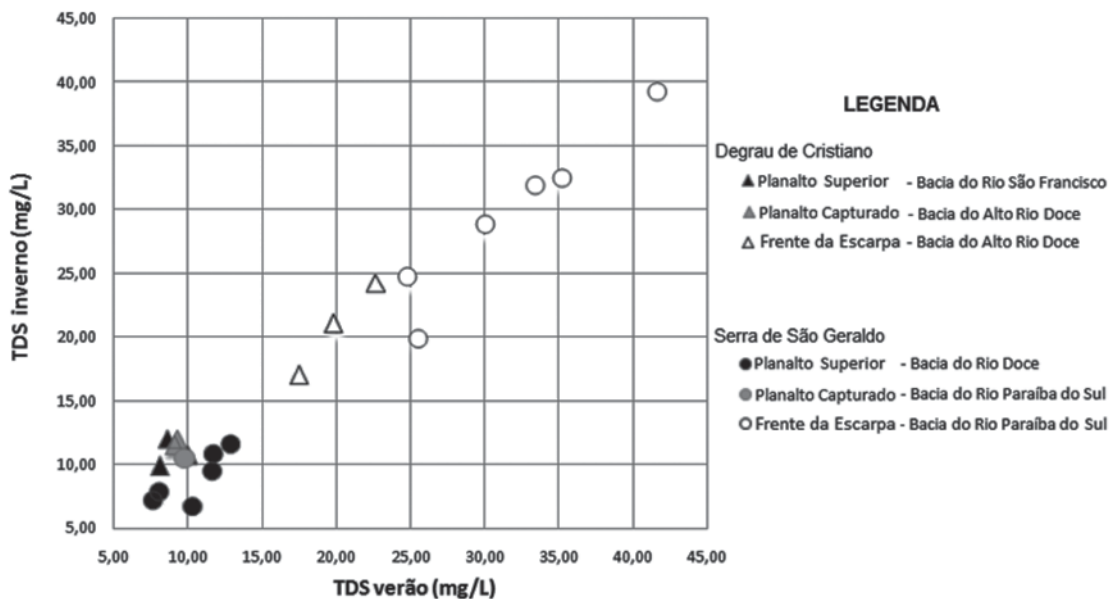


Figura 7 - Relação de TDS verão e TDS inverno.

A relação entre os TDS inverno e verão com as áreas das bacias apresenta dois agrupamentos bem definidos (Figura 8). No agrupamento das bacias que drenam as terras altas, observa-se que os valores de TDS são aproximadamente constantes independentemente da área. Já o agrupamento

das bacias que drenam as escarpas é subdividido entre as escarpas: em São Geraldo, os valores são mais elevados, e, em Cristiano Otoni, os valores são menores. Em ambas as escarpas, observa-se leve tendência à redução do TDS com o aumento da área das bacias.

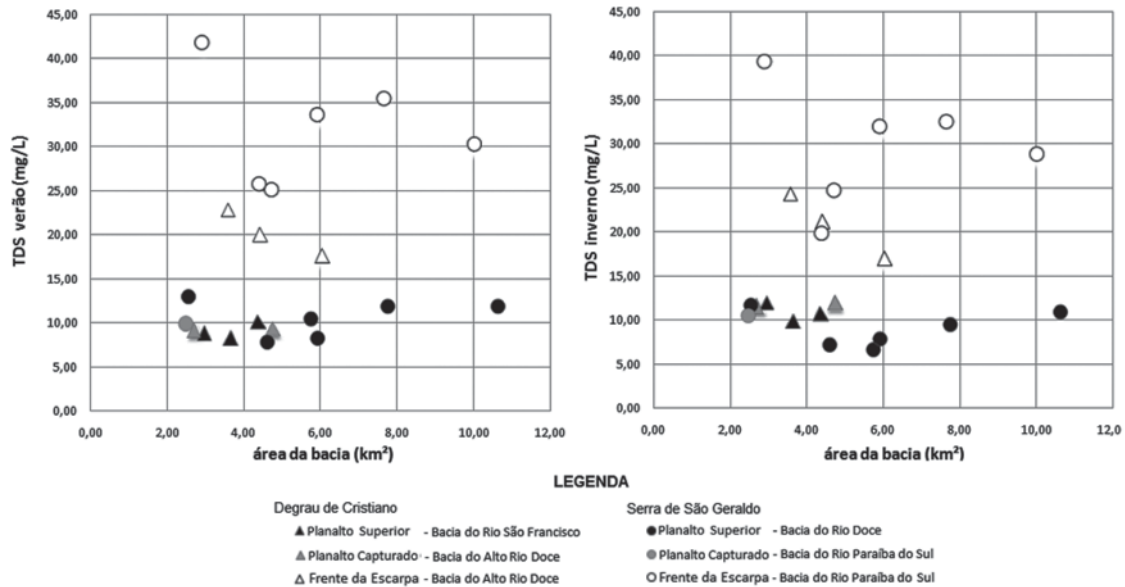


Figura 8 - Relação TDS e área das bacias para verão e inverno.

As bacias que drenam as terras altas apresentam médias de relevo entre 40 e 100m e médias de declividade entre 0,15 e 0,25m.m⁻¹, já as bacias que drenam as frentes das escarpas apresentam médias entre 120 e 300m e 0,25 e 0,33m.m⁻¹ para relevo e declividade respectivamente (Figura 10). Em linhas gerais os valores de TDS tendem a ser maiores para bacias que tenham maiores médias de relevo e maiores médias de declividade durante o período de chuvas (verão) e estiagem (inverno) (Figura 10). Desses dois atributos do relevo, a declividade explica melhor o comportamento interno das bacias de escarpa, já que, para ambas as áreas de estudo, bacias de maior declividade apresentam maiores TDS (Figura 10). Entretanto, o aumento da declividade média e do relevo médio não implica no aumento do TDS nas bacias que drenam as terras altas (Figura 10).

A inexistência de controle da declividade e do relevo na concentração de íons das águas superficiais que drenam as terras altas confirma o que Oliva *et al.* (2003) observaram em outras áreas graníticas ao redor do mundo sobre o controle da disponibilidade de minerais primários na denudação química. As águas

que chegam aos canais fluviais apresentam, em média, mesma concentração molar de soluto, independente da vazão ou da estação do ano, analogamente ao observado em áreas recobertas por latossolos (Oliva *et al.*, 2003). Assim, em áreas de manto de alteração intensamente alterado, os minerais primários, altamente intemperizáveis que fornecem Na, Ca, K e Mg, não estão mais presentes (Figura 6). Assim, a perda química que essas bacias sofrem é residual. Em contrapartida, o controle da declividade no TDS indica que o gradiente altimétrico e seu inerente maior potencial erosivo é responsável pela perda geoquímica mais intensa, fato analogamente observado em outras cabeceiras das bacias com alta declividade (Montgomery e Dietrich, 1989; Dietrich e Dunne, 1993; Salgado, *et al* 2004; Moore e Blenkinsop, 2006; Salgado, 2008). Tal fato pode ser explicado por diferenças no grau de evolução dos perfis de solos, onde horizontes incipientes, menos espessos, são mais susceptíveis ao intemperismo e os mais evoluídos, mais espessos, já foram bastante lixiviados, estando, portanto, menos suscetíveis ao intemperismo (Fernandes Filho *et al.*, 2008).

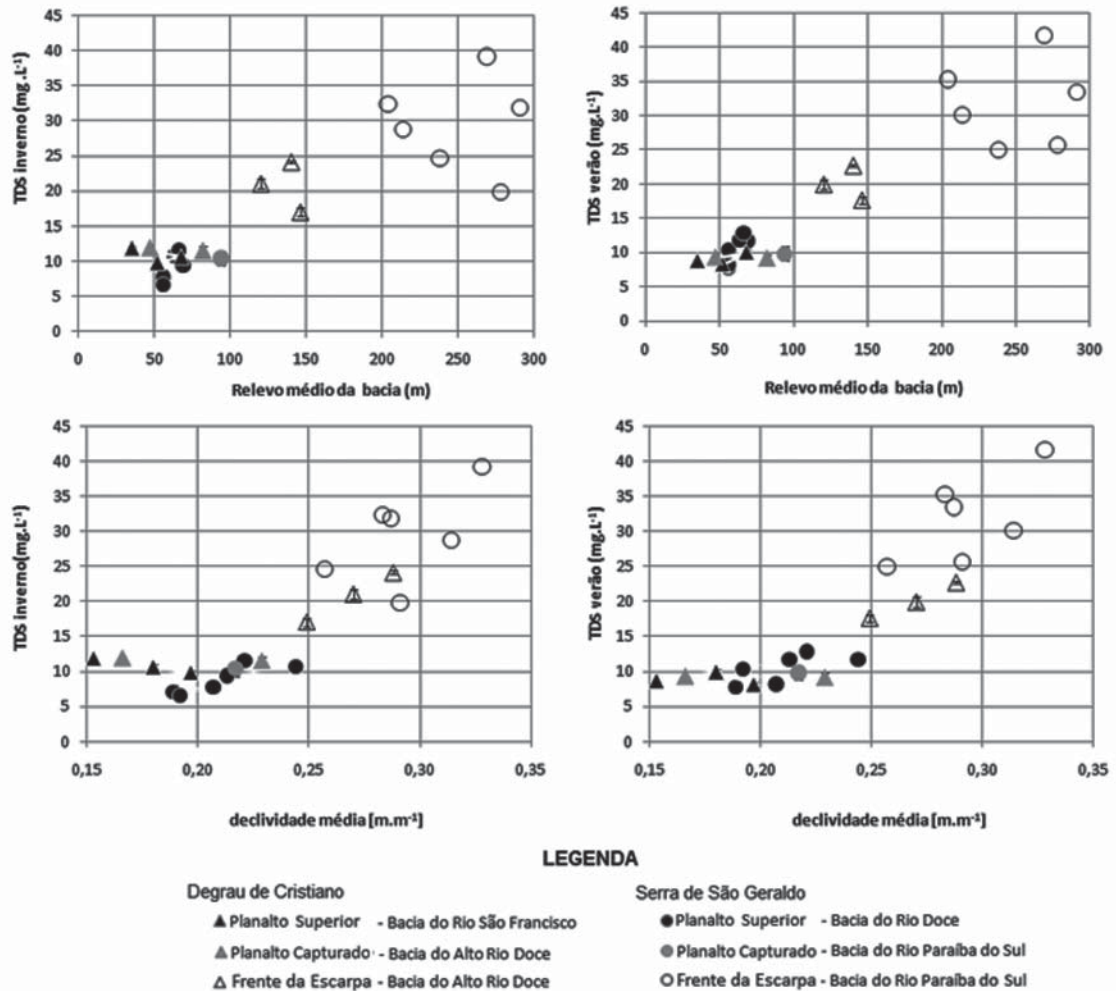


Figura 9 - Relação TDS e relevo; TDS e declividade das bacias para verão e inverno.

As taxas de denudação química calculadas para as bacias amostradas nos períodos chuvosos e de estiagem também indicam uma diferenciação entre o comportamento das terras altas e das escarpas (Figura 10). No verão, as bacias das terras altas apresentam denudação química semestral ($\text{ton.sem}^{-1}.\text{km}^{-2}$) entre 2,0 e 8,0 e, no inverno, entre 0,5 e 3,9. Já as bacias das escarpas apresentam, no verão, valores entre 5,5 e 15,5 e, no inverno, valores entre 4,5 e 10,0. Durante o verão, as bacias das terras altas e das escarpas apresentam uma ligeira tendência de aumento da denudação química, proporcionalmente ao aumento das áreas das bacias. Cabe ressaltar, ainda, que as bacias das terras altas capturadas apresentam um comportamento similar às bacias das terras altas, demonstrando que, embora as bacias tenham sido capturadas e estejam sobre franca incisão da rede de drenagem controlada pelas escarpas, seu comportamento geoquímico ainda é semelhante às porções não capturadas das terras altas (Figura 10), já que

o que rege a denudação química é a lixiviação dos mantos de alteração.

A diferenciação entre a intensidade da denudação química e, portanto, do rebaixamento do relevo entre cada um das unidades analisadas (terras altas e frente das escarpas) tem associação direta ao gradiente altimétrico, assim como a intensidade dos processos mecânicos. As bacias das terras altas – inclusive as porções capturadas – apresentam reduzidas taxas de denudação química ($\approx 6,0 \text{ ton.km}^{-2}$) e 150 de gradiente altimétrico entre cabeceira e foz, as bacias das escarpas apresentam taxas e gradientes altimétricos mais elevados, sendo $\approx 11,0 \text{ ton.km}^{-2}$ e ≈ 250 metros para o Degrau de Cristiano Otoni e $20,0 \text{ ton.km}^{-2}$ e ≈ 450 metros para a Serra de São Geraldo. Assim, de maneira geral, sob condições de drenagem livre, pode ser dito que o aumento do gradiente altimétrico intensifica os processos denudacionais químicos

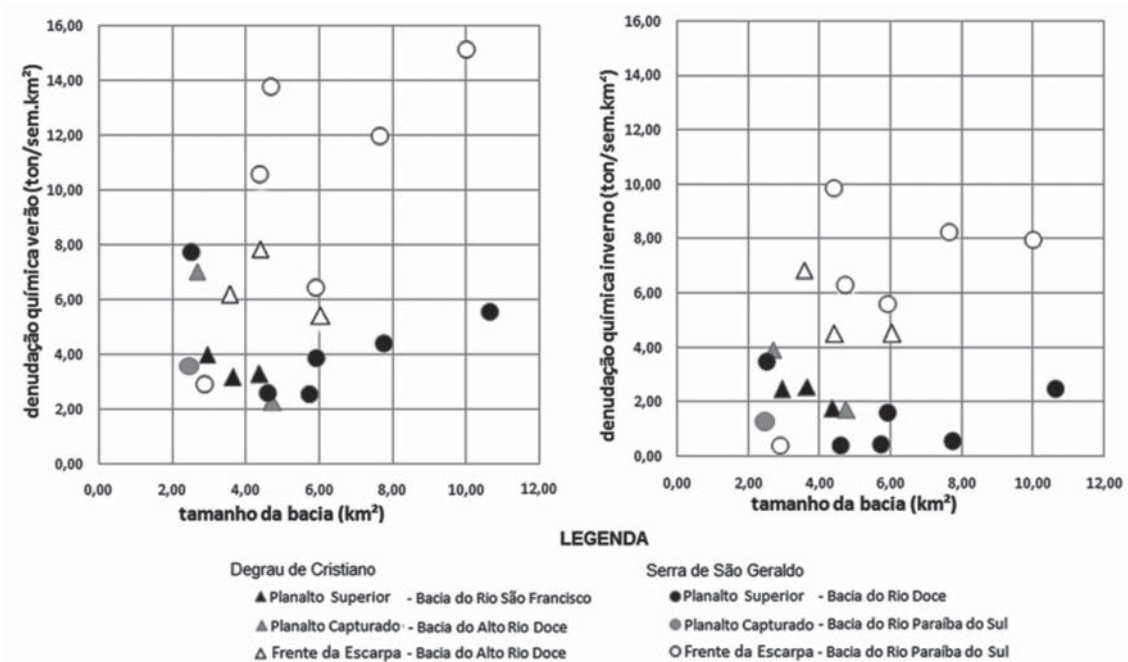


Figura 10 - Gráficos das taxas de denudação semestral dadas pelo tamanho das bacias hidrográficas amostradas para verão e inverno.

A taxa de rebaixamento do relevo ($m.Ma^{-1}$) apresenta valores reduzidos para as bordas das terras altas e elevados para as bordas das terras baixas – frente das escarpas (Figura 11). O rebaixamento das bordas das terras altas tem valores semelhantes, sendo de $2,47 m.Ma^{-1}$ para as terras altas da Serra de São Geraldo e $2,36$ para o de Degrau de Cristiano Otoni (Figura 11). Entretanto, o rebaixamento do relevo para

as escarpas apresenta dois valores médios: (i) $7,06 m.Ma^{-1}$ (para a Serra de São Geraldo); e (ii) $4,25 m.Ma^{-1}$ (para o Degrau de Cristiano Otoni). Estes valores, estimados com base na denudação química, têm a mesma intensidade do rebaixamento em regiões tropicais sob substrato granítico, cerca de $5 m.Ma^{-1}$ (Dunne, 1978; Oliva *et al.*, 2003; Salgado e Valadão, 2003; Salgado *et al.*, 2004).

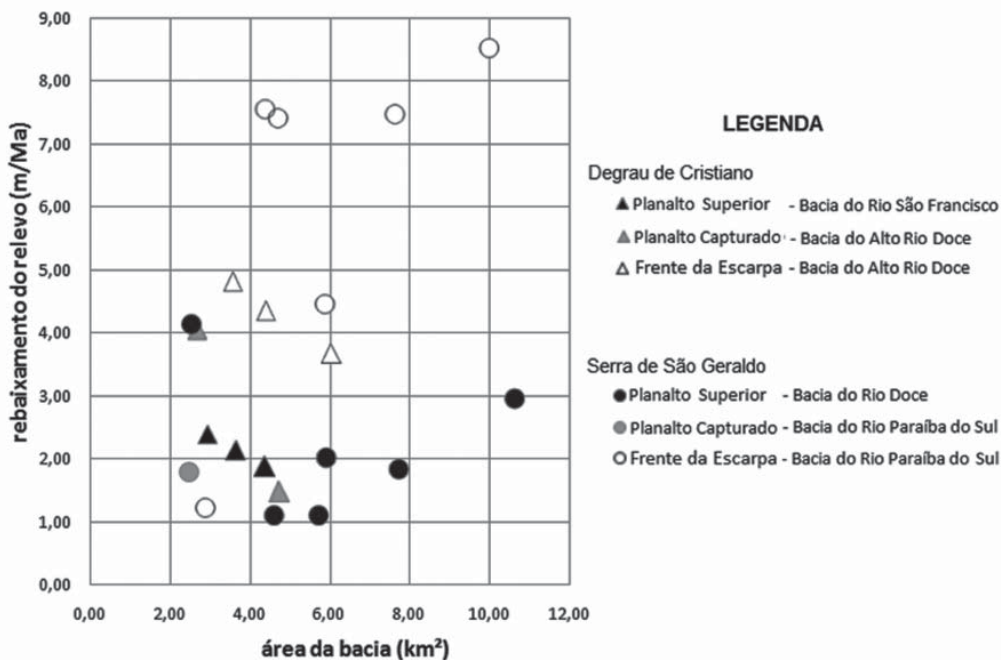


Figura 11 - Taxa de rebaixamento do relevo, calculada a partir dos elementos maiores e menores.

Considerações Finais

A investigação do papel da denudação química na evolução de escarpas que limitam grandes bacias hidrográficas do Brasil Oriental revelou que as águas que drenam as terras superiores e as escarpas apresentam assinaturas geoquímicas distintas, tendo comportamentos característicos para pH, Eh e TDS:

– As bordas das terras altas apresentam valores de pH levemente ácido, entre 6,00 e 6,70 e as escarpas apresentam pH de próximo a neutralidade a levemente básico, entre 6,90 e 7,40;

– Nas bordas das terras altas predominam valores de Eh mais elevados (0,127V no verão e 0,099V no inverno) em relação aos valores das escarpas (0,053V no verão; 0,47V no inverno);

– Os valores de sólidos totais dissolvidos são próximos a 10 mg.L⁻¹ na borda das terras altas e próximos a 27 mg.L⁻¹ nas escarpas, para o verão e inverno.

As bacias das porções capturadas pela retração das escarpas possuem mesmo comportamento das terras altas no qual estão inseridas, embora a rede de drenagem mais encaixada demonstre a franca atividade de processos erosivos mecânicos, ainda pontual.

As taxas de rebaixamento médio calculadas para as duas bordas interplanálticas estudadas demonstram a importância dos processos químicos na evolução dessas paisagens, com valores médios de 2,40 m.Ma⁻¹ para as bordas de ambas as terras altas, e 4,25 m.Ma⁻¹ e 7,06 m.Ma⁻¹ para escarpas de Cristiano Otoni e São Geraldo, respectivamente.

Os degraus morfológicos estudados são resultantes de processos erosivos ligados à disputa de áreas entre bacias hidrográficas, o que fica marcado na denudação química. As taxas mais elevadas para as bacias de escarpa da Serra de São Geraldo em relação ao degrau de Cristiano Otoni podem ser atribuídas ao maior gradiente altimétrico entre o topo e a base da escarpa e consequentemente maior potencial erosivo, o que fica expresso na forte dependência entre o TDS e a declividade, resultado dos mantos de alteração jovens e rasos que recobrem as escarpas. A inexistência dessa dependência nas bacias das terras altas expressa o elevado grau de evolução dos mantos de alteração graníticos nos planaltos do sudeste mineiro.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES/COFECUB, ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa. Agradecem também às geógrafas Amanda Raposo, Fernanda Oliveira e Letícia Faria pelo auxílio em campo.

Referências Bibliográficas

ANDERSON, S. P.; DIETRICH, W. E.; BRIMHALL-JR., G. H. Weathering profiles, mass-balance analysis, and rates of solute loss: Linkage between weathering and erosion in a small, steep catchment. *GSA Bulletin*, v. 114, n. 9, p. 1143-1158, 2002.

BEAUVAIS, A.; RUFFET, G.; HEÉNOUQUE, O.; COLIN, F. Chemical and physical erosion rhythms of west African Cenozoic morphogenesis: The ³⁹Ar ⁴⁰Ar dating of supergene K.Mn oxides. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, p. 1-15, 2008.

BLANCKENBURG, F. von. The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 237, p. 462-479, 2005.

BÜDEL, J. *Climatic geomorphology*. Princeton: Princeton University Press, 1982.

BURKE, B. C.; HEIMSATH, A. M.; DIXON, J. L.; CHAPPELL, J.; YOO, K. Weathering the scarpment: chemical and physical rates and processes, south-eastern Australia. *Earth Processes and Landforms*, v. 34, p. 768-785, 2009.

COMIG. *Mapa geológico do Estado de Minas Gerais*. CPRM, 2003.

DELGADO, I. M.; SOUZA, J. D.; SILVA, L. C.; SOUZA FILHO, N. C.; SANTOS, R. A.; PEDREIRA, A. J.; GUIMARÃES, J. T.; ANGELIM, L. A. A.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; FILHO, J. V. L.; VALENTE, C. R.; PERROTTA, M. M.; HEINECK, C. A. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (Ed.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: CPRM, p. 227-334. 2003.

DIETRICH, W. E.; DUNNE, T. The Channel Head. In: BEVEN, K.; KIRKBY, M. J. (Ed.). *Channel Network Hydrology*. Cap.7. John Wiley and Sons Ltd., 1993.

DREVER, J. I. *The Geochemistry of Natural Waters*. Prentice Hall, Inc. 1997.

DUNNE, T. Rates of chemical denudation of silicate rocks in tropical catchments. *Nature*, v. 274, n. 5668, p. 244-246, 1978.

DUPRÉ, B.; DESSERT, C.; OLIVA, P.; GODDÉRI, Y.; VIERS, J.; FRANÇOIS, L.; MILLOT, R.; GAILLARDET, J. Rivers, chemical weathering and earth's climate. *C. R. Geoscience*, v. 335, n. 1141-1160, 2003.

EPA. Stream Flow. In: AGENCY, E. P. (Ed.). *Volunteer Stream Monitoring: a methods manual*. Washington: EPA p. 134-138. 1997.

FERNANDES FILHO, E. I.; MAROTTA, G. S.; PORTES, R. C.; FRANÇA, M. M.; VIEIRA, E. M.; MOREIRA, G. F.; SOUSA, E. Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais. Viçosa: UFV, 2008.

FERRIER, K. L.; KIRCHNER, J. W.; FINKEL, R. C. Climatic and erosional effects on chemical denudation rates: measurements

- over millennial timescales in the Idaho Batholith. In: AGU Fall Meeting Abstracts. p.H53G-03. 2008.
- GUNNELL, Y.; CARTER, A.; PETIT, C.; FOURNIER, M. Post-rift seaward downwarping at passive margins: New insights from southern Oman using stratigraphy to constrain apatite fission-track and (U-Th)/He dating. *Geology*, v. 35, n. 7, p. 647-650, 2007.
- KIRCHNER, J. W.; RIEBE, C. S.; FERRIER, K. L.; FINKEL, R. C. Cosmogenic nuclide methods for measuring long-term rates of physical erosion and chemical weathering. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 88, n. 1-3, p. 296-299, 2006.
- MILLOT, R.; GAILLARDET, J.; DUPRÉ, B.; ALLÈGRE, C. J. The global control of silicate weathering rates and the coupling with physical erosion: new insights from rivers of the Canadian Shield. *Earth and Planetary Sciences Letters*, v. 196, p. 83-98, 2002.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Sources Areas, Drainage Density, and Channel Initiation. *Water Resources Research*, v. 25, n. 8, p. 1907-1919, 1989.
- MOORE, A.; BLENKINSOP, T. Scarp retreat versus pinned drainage divide in the formation of the Drakensberg escarpment, southern Africa. *South Africa Journal of Geology*, v. 109, n. 4, p. 599-610, 2006.
- NAHON, D. *Introduction to the petrology of soils and chemical weathering*. New York: John Wiley and Sons, 1991.
- NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; PINHEIRO, C. M.; MOL, V. S. Folha SE.X-D-II. In: COMIG (Ed.). *Projeto Leste*. Belo Horizonte: COMIG, 2003.
- OLIVA, P.; VIERS, J.; BERNARD, D. Chemical weathering in granitic environments. *Chemical Geology*, v. 202, p. 225-256, 2003.
- OLLIER, C. D. Morphotectonics of Passive Continental Margin: Introduction. *Zeits Für Geomorpho.*, v. 54, p. 1-9, 1985.
- PINET, P.; SOURIAU, M. Continental erosion and large-scale relief. *Tectonics*, v. 7, n. 3, p. 563-582, 1988.
- RIEBE, C. S.; KIRCHNER, J. W.; FINKEL, R. C. Erosional and climatic effects on long-term chemical weathering rates in granitic landscapes spanning diverse climate regimes. *Earth and Planetary Sciences Letters*, v. 224, p. 547-562, 2004.
- SALGADO, A. A. R. Aplicação dos Isótopos cosmogênicos à Geomorfologia: trabalhos já realizados e perspectivas futuras. In: II Encontro Latino Americano de Geomorfologia e VII Simpósio Nacional de Geomorfologia, Belo Horizonte. *Anais. TecArt*, 2008. 1v. p.10.
- SALGADO, A. A. R.; COLIN, F.; NALINI JR., H. A.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A. F. F. C.; VARAJÃO, C. A. C. O papel da Denudação Geoquímica no processo de erosão diferencial no Quadrilátero Ferrífero/MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 5, n. 1, p. 55-69, 2004.
- SALGADO, A. A. R.; VALADÃO, R. C. Contribuição da denudação geoquímica na evolução da erosão diferencial no Espinhaço Meridional - MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 4, n. 2, p. 31-40, 2003.
- SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; NALINI JR., H. A.; CHEREM, L. F. S.; MARENI, B. R.; BRINDUSA, C. B. Estimativa das taxas de erosão das terras altas da alta bacia do rio das Velhas no Quadrilátero Ferrífero: implicações para a evolução do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 8, n. 2, p. 1-8, 2007.
- SCHALLER, M.; BLUM, J. D.; EHLERS, T. A. Combining cosmogenic nuclides and major elements from moraine soil profiles to improve weathering rate estimates. *Geomorphology*, v.106, p. 198-205, 2008.
- SILVA, C. M. T.; ALKIMIN, F. F.; PEDROSA SOARES, A. C. Geometria e evolução do feixe de zonas de cisalhamento Manhuaçu - Santa Margarida, Orôgeno Araçuaí - MG. *Revista da Escola de Minas*, v. 62, n. 1, p. 23-34, 2009.
- SUMMERFIELD, M. A. *Global geomorphology: an introduction to the study of landforms*. New York: Longman, 1991.
- THOMAS, M. F. *Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 1994.
- THOMAS, M. F. Models for landscape development on passive margins: some implications for relief development in glaciated areas. *Geomorphology*, v. 12, p. 3-15, 1995.
- THOMAS, M. F. Models for landscape development on passive margins: some implications for relief development in glaciated areas. *Geomorphology*, v. 12, p. 3-15, 1995.
- VARAJÃO, C. A. C.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; BRAUCHER, R.; COLIN, F.; NALINI JR., H. A. Estudo da Paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (¹⁰Be) e da pedogênese. *Revista brasileira de Ciências do Solo*, v. 33, p. 1409-1425, 2009.
- VITTE, J. C. Ectoplanação dinâmica e episódica nos trópicos quentes e úmidos. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 16, p. 105-118, 2005.
- WHITE, A. F.; BLUM, A. E. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, n. 9, p. 1729-1747, 1995.
- WHITE, A. F.; BLUM, A. E.; SCHULTZ, M. S.; VIVIT, D. V.; STONE, D. A.; LARSEN, M. C.; SHEILA, M. F.; EBERL, D. Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: long term versus short term weathering fluxes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 62, n. 2, p. 209-226, 1998.